

УДК 548.732

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ МОДУЛЯЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВНЕШНЕМ АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

А.Р. МКРТЧЯН<sup>1,2</sup>, А.С. БАГДАСАРЯН<sup>3,4</sup>, В.Р. КОЧАРЯН<sup>1,2\*</sup>,  
А.А. КИЗИРИДИ<sup>2</sup>, Т.Р. МУРАДЯН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван, Армения

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, Россия

<sup>3</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Научно-исследовательский институт радио, Москва, Россия

\*e-mail: vahan2@yandex.ru

(Поступила в редакцию 26 августа 2016 г.)

Экспериментально рассмотрена двухкристальная дифракция рентгеновского излучения от отражающих атомных плоскостей (10 $\bar{1}1$ ) монокристалла кварца с АТ-срезом в геометрии Лауэ, когда оба кристалла одновременно находятся в поле объемных акустических волн. Показано, что в результате пространственной модуляции отраженного пучка получается нечетное число параллельных пучков рентгеновского излучения.

### 1. Введение

Создание новых более чувствительных и универсальных методов для проведения исследований в различных областях науки и техники, как например, определение реальных структур совершенных кристаллов, томография биологических объектов, элементов микро- и наноэлектроники и т. д., является актуальной задачей. Для решения этой задачи одним из необходимых факторов является получение альтернативных монохроматических, без гармоник, пучков гамма квантов с управляемыми в пространстве и во времени параметрами как, например, угловое расхождение и интенсивность. Одним из таких методов является дифрактометрия излучения длин волн порядка ангстрем при наличии внешних возмущений. Наличие внешних воздействий (температурный градиент и акустические колебания) приводит к увеличению интенсивности отраженного рентгеновского излучения в процессе рассеяния рентгеновских лучей от монокристаллов, находящихся в условии Брэгга по геометрии Лауэ. При определенных параметрах внешних воздействий для отражающих атомных плоскостей (10 $\bar{1}1$ ) кварца происходит полная переброска рентгеновского излучения из

направления прохождения в направлении дифракции [1]. Поскольку зависимость интенсивности отраженного рентгеновского излучения от параметров внешнего воздействия дала возможность получить управляемые рентгеновские пучки во времени и в пространстве, в дальнейшем были проведены многочисленные исследования разных характеристик (угловая расходимость, пространственное распределение и энергетическая дисперсия) отраженного рентгеновского излучения [2–4].

В работах [5,6] экспериментально и теоретически показано, что в геометрии Лауэ с помощью акустического поля и температурного градиента можно контролировать местоположение фокуса отраженного рентгеновского излучения, а также преобразовывать сферическую волну в плоскую. А синусоидальная модуляция кристаллической решетки с коротковолновой поверхностной акустической волной при дифракции рентгеновского излучения в геометрии Брэгга приводит к появлению на кривой качания дифракционных сателлитов, угловое положение и интенсивность которых зависят от амплитуды и длины волны ультразвуковой сверхрешетки, от энергии падающего рентгеновского излучения и порядка рефлекса [7].

В работах [8,9] экспериментально исследована дифракция рентгеновского излучения от разных отражающих атомных плоскостей монокристалла кварца с АТ-срезом в геометрии Лауэ, когда в кристалле возбуждены объемные акустические волны. Показано, что объемные акустические волны приводят к пространственной модуляции дифрагированных пучков и во фронтальном сечении возникают полосы интенсивности. В зависимости от порядка гармоники возбуждения акустического поля количество полос изменяется следующим образом:  $m = n + 1$ , где  $n$  – порядок гармоники и принимает нечетные число, т. е. число полос интенсивностей в фронтальном сечении четное. Во всех случаях две крайние полосы получаются более узкими и менее интенсивными, чем остальные. Интенсивность и контраст возникающих полос зависит от амплитуды переменного напряжения, приложенного к кристаллу. В работах [10,11] показано, что в монокристалле кварца АТ-среза при отражении от атомных плоскостей  $(10\bar{1}1)$  в геометрии Лауэ наличие объемных акустических волн приводит к одновременному увеличению интенсивностей отраженных и проходящих дифрагированных пучков до 100% участия процесса дифракции проходящего недифрагированного пучка. Причем, оба отраженный и проходящий пучки становятся идентичными при определенных значениях амплитуды возбуждения акустических колебаний.

В настоящей работе экспериментально рассмотрена возможность получения полос с нечетным числом в поперечном сечении отраженного рентгеновского пучка от отражающих атомных плоскостей  $(10\bar{1}1)$  монокристалла кварца с АТ-срезом в геометрии Лауэ при наличии объемных акустических волн.

## 2. Эксперимент

Экспериментальное исследование проводилось на рентгеновской установке ДРОН-3 с анодной молибденовой трубкой БСВ-25 (размер фокусного пятна источника  $0.2 \times 10 \text{ мм}^2$ ). Использовалась двухкристальная ( $n$ ;  $-n$ ) дифракционная схема (рис.1).

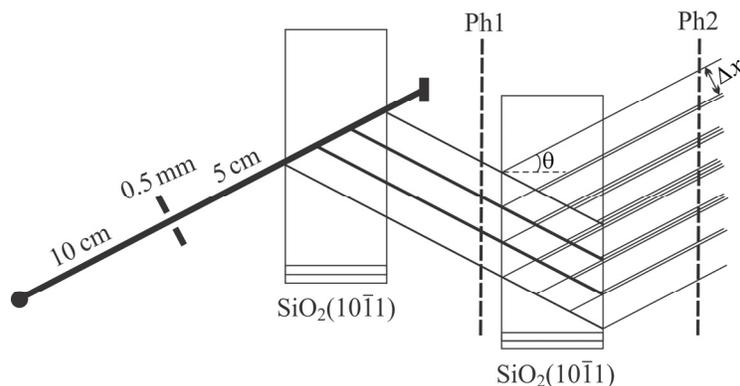


Рис.1. Схема эксперимента.

На расстоянии 10 см от источника была установлена щель с шириной 0.5 мм. Проходя через щель, пучок падает на монокристалл кварца, который поставлен в 5 см от щели в геометрии Лауэ. Коллимация пучка выбрана так, чтобы от атомных плоскостей  $(10\bar{1}1)$  отражалось только излучение  $\text{MoK}\alpha_1$  (угол Брэгга  $6^\circ 6'$ ). После первого образца, в направления отраженного пучка, на расстоянии 18 см идентичным образом установлен второй монокристалл кварца. Регистрация рентгеновского пучка с детектором проводилась на расстоянии 20 см от второго кристалла. Поперечное сечение отраженных пучков от первого (Ph1) и второго кристалла (Ph2) регистрировалось на расстоянии 10 см с помощью рентгеновской пленки. Образцы представляли собой пластинки в виде шайбы толщиной 1.7 мм из монокристалла кварца АТ-среза, поверхности которых покрыты контактами алюминиевого слоя с толщиной менее 10 мкм. Возбуждение объемных акустических волн в кристаллах осуществлялось с помощью генераторов электромагнитных волн, которые были подключены к контактам.

Для получения пространственной модуляции интенсивности отраженного пучка при наличии акустических волн рассмотрены отражения от атомных плоскостей  $(10\bar{1}1)$  монокристалла кварца. При возбуждении кристаллов разными порядками резонансной частоты наблюдается увеличение интенсивности отраженного пучка в зависимости от величины амплитуды переменного электрического напряжения, а в поперечном сечении появляются вертикальные полосы, количество которых зависит от порядка резонансной частоты [8–11].

Без возбуждения кристаллов интенсивность отраженного излучения первого исследуемого образца составила 40000 имп/с, после прохождения второго кристалла осталось 7800 имп/с. Интенсивность отраженного пучка от второго кристалла составляла 1800 имп/с.

После возбуждения первого образца разными порядками резонансной частоты наблюдалось увеличение интенсивности отраженного пучка в зависимости от величины амплитуды переменного электрического напряжения. Максимальная интенсивность отраженного излучения от первого кристалла кварца при частоте возбуждения 2.936 МГц и 4.888 МГц составила 220 000 имп/с. Интенсивность проходящего пучка от второго кристалла составила 43 000 имп/с, а интенсивность отраженного пучка – 4200 имп/с. После возбуждении второго образца порядками резонансной частоты 2.936 МГц и 4.888 МГц отраженная интенсивность от второго образца составила 21 000 имп/с.

На рис. 2а,с приведены поперечные сечения отраженных пучков на расстоянии 10 см от первого и второго образца, соответственно, при одновременном возбуждении образцов с частотой 2.936 МГц. Амплитуда акустических колебаний обоих образцов соответствовала максимальному значению интенсивности отраженного пучка (напряжение электромагнитного поля 40 В). На рис.2b,d приведены поперечные сечения отраженных пучков при тех же условиях для одновременного возбуждения образцов с частотой 4.889 МГц.

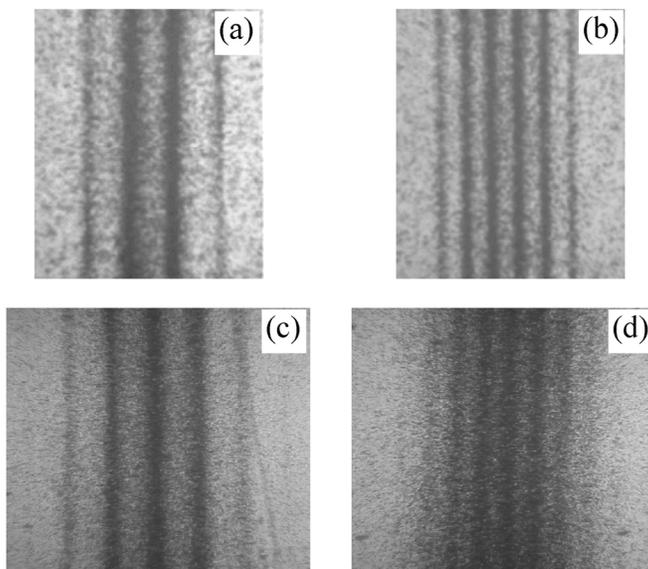


Рис.2. Поперечные сечения отраженного пучка от атомных плоскостей  $(10\bar{1}1)$  при наличии акустических колебаний от (a,b) первого кристалла и (c,d) второго кристалла при частоте возбуждения 2.936 МГц и 4.888 МГц, соответственно.

На рис.3 приведены распределения интенсивности поперечных сечений отраженного рентгеновского излучения, полученные с помощью фотометра и соответствующие фотоснимкам, приведенным на рис.2.

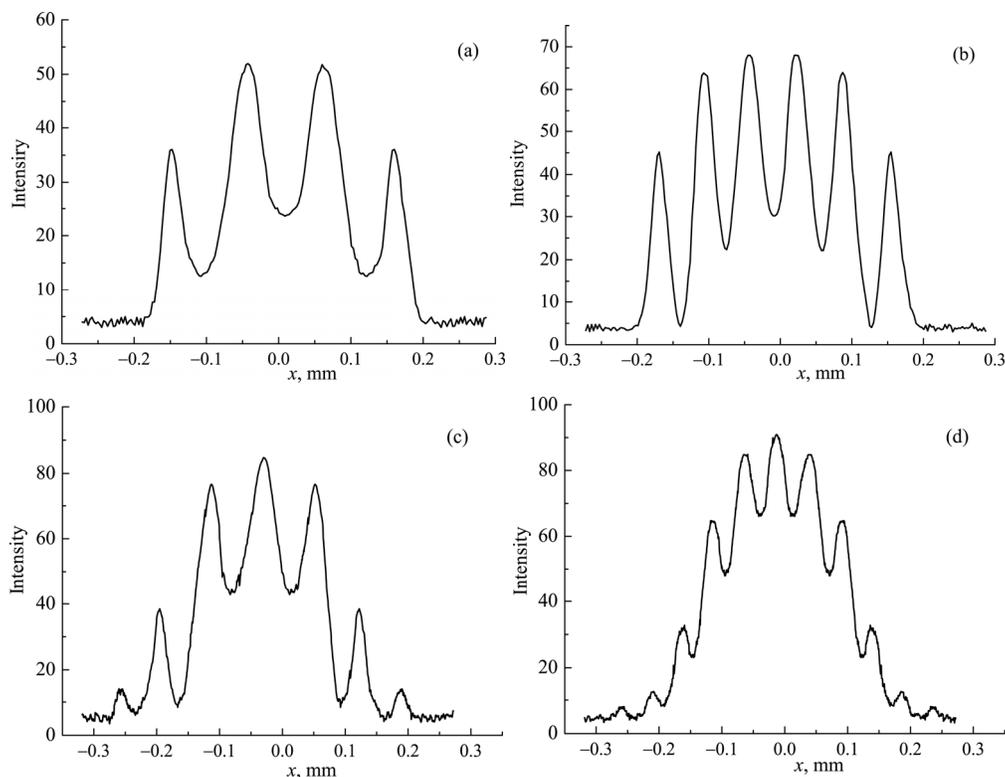


Рис.3. Распределение интенсивности поперечных сечений отраженного рентгеновского излучения от (a,b) первого кристалла и (c,d) второго кристалла, соответственно.

### 3. Обсуждение результатов

Как видно из рис.2a,b и рис.3a,b число полос в поперечном сечении отраженного рентгеновского пучка от первого кристалла получается четным, что соответствует условию  $m = n + 1$ , где  $n$  – порядок гармоники и принимает нечетные значения. Известно, что полосы формируются от пучностей стоячей акустической волны [9]. Следовательно, они распространяются друг от друга на расстояниях  $\Delta x = \lambda \sin \theta \cos^2 \theta$ , где  $\lambda$  – длина рентгеновского излучения и  $\theta$  – угол Брэгга. То есть, при присутствии акустических волн, когда на первый кристалл под углом Брэгга падает узкий коллимированный пучок, то имеем отраженные рентгеновские пучки (полосы) с количеством  $n + 1$ . Таким образом, на второй кристалл падает  $n + 1$  параллельных рентгеновских пучка на расстоянии  $\Delta x$  друг от друга (рис.1). Поскольку толщина второго кристалла равна толщине первого

кристалла и они возбуждаются одинаковой частотой, то при отражении от второго кристалла каждый пучок будет разделен на  $n + 1$  пучка, которые тоже удалены друг от друга на расстояние  $\Delta x$ . Следовательно, полученные от каждого падающего пучка  $n + 1$  пучка, отраженных от второго кристалла, перекроют  $n$  пучки, полученные от предыдущего пучка. В результате падающие на второй кристалл  $n + 1$  пучка после отражения создадут  $2n + 1$  пучка, которые разделены друг от друга размером  $\Delta x$  (рис.1). Из рис.1 видно, что самую большую интенсивность будет иметь центральный пучок, а интенсивности левых и правых пучков будут все более и более уменьшаться.

Из рис.2с,d и рис.3с,d видно, что число полос (параллельных пучков) в поперечном сечении отраженного рентгеновского пучка от второго кристалла получается нечетным, что соответствует условию  $m = 2n + 1$ , где  $n$  – порядок гармоники и принимает нечетные значения, т. е. число полос интенсивностей в поперечном сечении нечетное. Отметим также, что наибольшая интенсивность получается на средних пиках, как и ожидалось.

#### 4. Заключение

Таким образом, показано, что при возбуждении первого кристалла разными порядками резонансной частоты число полос в поперечном сечении отраженного рентгеновского пучка получается четным, а при двухкристальной схеме число полос получается нечетным. Используя этот метод, можно управлять количеством возникающих полос в поперечном сечении, т. е. можно любое четное число возникающих полос преобразовать в нечетное.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.Р. Мкртчян, М.А. Навасардян, В.К. Мирзоян. Письма в ЖТФ, **8**, 677 (1982).
2. А.Р. Мкртчян, Р.Г. Габриелян, А.А. Асланян, А.Г. Мкртчян, Х.В. Котанджян. Изв. АН Арм. ССР, Физика, **21**, 297 (1986).
3. А.Р. Мкртчян, А.Г. Мкртчян, В.Р. Кочарян, А.Е. Мовсисян, С.Б. Дабагов, А.П. Потылицын. Изв. НАН Армении, Физика, **48**, 212 (2013).
4. В.Р. Кочарян, Р.Ш. Алексанян, К.Г. Труни. Изв. НАН Армении, Физика, **45**, 290 (2010).
5. А.Р. Мкртчян, М.А. Навасардян, Р.Г. Габриелян. Письма в ЖТФ, **11**, 1354 (1985).
6. A.R. Mkrtychyan, M.A. Navasardian, R.G. Gabrielyan, L.A. Kocharian, R.N. Kuzmin. Solid State Commun., **59**, 147 (1986).
7. Д.В. Иржак, Д.В. Рошупкин, Р. Тукулу, О. Матон. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **1**, 10 (2002).
8. В.К. Мирзоян, А.А. Егиазарян, В.Н. Агабекян, П.В. Мирзоян. Известия НАН Армении, Физика, **43**, 104 (2008).
9. В.К. Мирзоян, А.А. Егиазарян, Э.Г. Багдасарян, П.В. Мирзоян. Известия НАН Армении, Физика, **42**, 355 (2007).

10. **В.Р. Кочарян, Т.Р. Мурадян, Р.В. Амирагян, А.С. Гоголев, С.Г. Хлопузян.** Труды конференции «Рентгеновская оптика – 2014», г. Черноголовка, 168, (2014).
11. **Т.Р. Мурадян, Р.В. Амирагян, С.Г. Хлопузян, А.Р. Вагнер, В.Р. Кочарян.** Известия НАН Армении, Физика, **50**, 269 (2015).

ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ՏԱՐԱԾԱԿԱՆ ՄՈՂՈՒԼՈՒՄ ԱՐՏԱՔԻՆ  
ԱԿՈՒՍՏԻԿ ԴԱՇՏԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՄԲ

Ա.Ռ. ՄԿՐՏՉՅԱՆ, Ա.Ս. ԲԱԴԴԱՍԱՐՅԱՆ, Վ.Ռ. ՔՈՉԱՐՅԱՆ,  
Ա.Ա. ԿԻԶԻՐԻԴԻ, Տ.Ռ. ՄՈՒՐԱԴՅԱՆ

Փորձականորեն դիտարկված է ռենտգենյան ճառագայթման երկբյուրեղ դիֆրակցիա AT կտրվածքով կվարցի միաբյուրեղի (10 $\bar{1}$ 1) անդրադարձնող ատոմական հարթությունների ընտանիքից՝ Լաուէի երկրաչափության պայմաններում, երբ երկու բյուրեղներում միաժամանակ առկա են ծավալային ակուստիկ ալիքներ: Ցույց է տրված, որ անդրադարձած փնջի տարածական մոդուլման արդյունքում ստացվում են կենտ թվով ռենտգենյան ճառագայթման զուգահեռ փնջեր:

SPATIAL MODULATION OF X-RAYS AT THE EXTERNAL ACOUSTIC FIELD

A.R. MKRTCHYAN, A.S. BAGHDASARYAN, V.R. KOCHARYAN,  
A.A. KIZIRIDI, T.R. MURADYAN

Two-crystal diffraction of X-rays from the (10 $\bar{1}$ 1) reflecting atomic planes of the quartz single crystal of AT-cut is considered in the Laue geometry when both the crystals are excited by volume acoustic waves. It is shown that as a result of the spatial modulation of the reflected beam, odd numbers of parallel beams of X-rays are obtained.